

推薦論文

# 共有アンテナを用いた 異種無線多重MIMOチャネル動的構成方式

奥本 裕介<sup>1</sup> 滝沢 泰久<sup>2</sup>

受付日 2020年5月2日, 採録日 2020年7月7日

**概要:** 近年, スマートフォンなどにおける多様なアプリケーションの利用拡大, および IoT の社会への浸透にともない, ネットワークトラフィックが急増している. そのために, 新たな無線通信システムとして第 5 世代移動通信 (5G) の普及が望まれている. 5G では, 容量拡大のため高周波数帯の利用と MIMO を用いる. 高周波数の利用は通信範囲が狭くなることから, 5G においてアンテナ数が増大することが予想されている. 一方で, アンテナは無線システムごとに固定化されており, アンテナリソースを他の無線システムと共有利用することはできない. MIMO ではアンテナ数に比例して帯域拡大が見込まれるが, アンテナ数が増加するとその容量拡大は鈍化する. したがって, 単一无線システムで構成される MIMO チャネルでは容量拡大に限界がある. しかし, アンテナリソースを他の無線システムと共有利用し, MIMO チャネル容量がより拡大可能な無線システムへアンテナを, 適宜, 割り当てることにより, 複数の無線システムの MIMO チャネルの総容量拡大が見込める. 以上のことから本論文では, 5G 環境において増加する多数のアンテナリソースを複数の異種無線システム間で共有し, 適宜, 必要に応じてアンテナをそれぞれの無線システムに分配して, 多重の MIMO チャネルの総容量を拡大する異種無線多重 MIMO チャネル動的構成方式を提案する. さらに, 多重の MIMO チャネルを仮定の単一 MIMO チャネルに構成・集約することにより, アプリケーションのスループット向上を図るシステム構成方式を示す.

キーワード: 5G, MIMO

## Dynamic Configuration for Multiplex MIMO channel with Shared Antenna on Heterogeneous Wireless Systems

YUSUKE OKUMOTO<sup>1</sup> YASUHISA TAKIZAWA<sup>2</sup>

Received: May 2, 2020, Accepted: July 7, 2020

**Abstract:** Recently, network traffic has increased rapidly because of the expansion of the utilization of various applications in smartphones and the spread of IoT. Therefore, the 5th generation mobile communication (5G) is expected as a new wireless communication system. 5G uses high frequency bands and MIMO for communication capacity expansion, and then requires a much large number of antennas because the communication range in high frequency band becomes narrower. Therefore, in 5G, a large number of antennas definitely will be deployed. In MIMO, the communication capacity increases according as increase in antennas, however it saturates on a excessive number of antennas because the difference for characteristics in space division with multiple antennas decreases. Therefore, the MIMO in a wireless system cannot effectively utilize a large number of antennas in 5G. In this paper, to effective utilization for a large number of antennas and MIMO technology in 5G, dynamic configuration for multiplex MIMO channel with shared antennas on heterogeneous wireless systems is proposed. The proposal lets heterogeneous wireless systems share their antennas, dynamically distributes the shared antennas among them, and increases sum of their MIMO channel capacity, furthermore increases application throughput by virtual bonding their MIMO channels.

**Keywords:** 5G, MIMO

### 1. はじめに

移動端末として, 高性能携帯端末であるスマートフォン

本論文の内容は 2019 年 9 月の第 180 回 DPS・第 85 回 EIP 合同研究発表会で報告され, マルチメディア通信と分散処理研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

<sup>1</sup> 関西大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Engineering, Kansai University, Suita, Osaka 564-8680, Japan

<sup>2</sup> 関西大学環境都市工学部  
Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University, Suita, Osaka 564-8680, Japan

やタッチパネルによる入出力操作を可能とするタブレット PC が続々と登場し、様々なアプリケーションの利用拡大が急速に進んでいる。これにともない無線ネットワーク内には多様なコンテンツが増え、使用するデータの量やユーザ数も年々増加している。また、IoT (Internet of Things) の社会への浸透により、ネットワークに内包するデバイス数、トラフィックは今後さらに増加すると予想される。このような無線通信の利用状況から無線通信において周波数帯域の広帯域化が求められる [1]。しかしながら、データ通信に適した周波数帯域は既存の無線システムに割り当てられているため、周波数不足の問題が顕在化している。

これら多様な無線システムの利用拡大と周波数不足の背景から、近年では新たな無線通信システムとして第 5 世代移動通信（以降、5G: 5th Generation）[2] が実装に向けて動き出している。5G では使用する周波数を従来の周波数帯に加えて高周波数帯も利用する。これにより、高速・大容量、多接続、低遅延化を実現する。しかしながら、従来よりも高い周波数帯を利用することで、通信距離が短くなる。したがって、5G サービス域を増やすため、今後、アンテナ数が格段に増加することが予想できる。また、無線通信の広帯域化技術として Multiple-Input and Multiple-Output（以降、MIMO）[3] が採用されている。MIMO は送信機と受信機の双方で複数のアンテナを使い通信ストリームを増やすことで空間を多重化し、帯域拡大を図る。理論的にはアンテナ数に比例して帯域拡大が見込まれる。したがって、5G における無線システムの広帯域化は MIMO とそのアンテナ数に強く依存する。

現在、アンテナは無線システムごとに固定化されており、アンテナリソースに基づく MIMO チャネルの容量拡大は単一无線システム内に限定される。また、MIMO においてアンテナ数を増やすことにより帯域拡大を図れるが、アンテナ数の増加に従い空間分割の特性効果が低下して、帯域拡大が鈍化する。したがって、複数の無線システム間でアンテナを共有し、MIMO チャネル容量がより拡大する無線システムへアンテナを割り当てることにより、複数無線システムにおける MIMO チャネル総容量を拡大することが可能である。

以上のことから、本論文では、5G 環境の多数のアンテナリソースの有効活用によりさらなる容量拡大を図るため、アンテナを異種無線システム間で共有して、それぞれの無線システム状況に応じて適切にアンテナを分配し、多重の MIMO チャネルの総容量を拡大する異種無線多重 MIMO チャネル動的構成方式を提案する。さらに、構成された異種無線システムの MIMO チャネルを集約して仮想の単一无線システムとし、アプリケーションのスループット向上を図る。

## 2. 関連研究

近年、多様な MIMO の研究がさかんに行われている。MIMO の研究は 3 つに分類される。以下では、3 つの分類において代表的・典型的な研究を示す。

### ● MU-MIMO

MU-MIMO では、アンテナごとに異なる指向性を持った信号を複数の端末に送信する 1 対多の通信をする。受信側 1 端末あたりの最大通信速度が上がるわけではないが、送信側が同時に送信できる端末が増えるため、システム全体ではスループットが向上する。MU-MIMO は空間方向に多重することで時間利用効率を向上させるが、無線メッシュネットワークでは、複数の受信ノード、送信ノードが存在し、空間利用率の低下が課題となっている。近年の研究では、これを解決するために制御フレームを用いて不必要な NAV をキャンセルさせることで、パケット送信を密に行い面的性能を向上させる研究 [4] やトラフィック増量に対応可能なユーザを選択して通信を行う研究 [5] などがされている。

### ● Massive-MIMO

従来の MIMO では、アンテナ 4~8 本で使用されている。Massive-MIMO では送信側のアンテナが大幅に増え、数十から数百のアンテナ素子を使用してデータを送信する。また、一定方向に指向性の高い電波を送るビームフォーミングという技術を組み合わせることで、1 人 1 人に専用の電波を割り当てることができ、基地局間の干渉を抑えながら電波強度を上げ、高速通信を可能にする。しかし、Massive-MIMO ではスモールセル間の干渉が発生する。スモールセルをクラスタリングすることで干渉を減少させる、動的スモールセルクラスタリング方式が提案されている。これを基に、クラスタ間干渉を調整する手法が研究されている [6], [7]。

### ● Distributed-MIMO

5G 環境では通信範囲が狭まることにより、アンテナが密に配置されることが想定される。Distributed-MIMO では、密に配置されているアンテナを協調制御する。複数の基地局を仮想的に 1 つの基地局として通信することで、各基地局で協調制御された電波を利用することができ、電波干渉を防ぐ。Distributed-MIMO では、評価実験が行われている [8], [9], [10]。

以上のように、MIMO において多様な研究が行われている。しかし、いずれも、単一无線システム内の MIMO チャネルの大容量化または多接続性を目的とし、複数の無線システムにおける MIMO チャネル容量とする視点は考えられていない。

### 3. 提案方式

#### 3.1 MIMO チャンネル特性

MIMO チャンネル容量はシャノンの定理 [11] に基づいて次ように定式化できる.

$$C = x * B \log_2 \left( 1 + \frac{SNR}{x} \right) \quad (x > 0) \quad (1)$$

$C$  は MIMO チャンネル容量,  $x$  は MIMO アンテナ数,  $B$  は帯域幅,  $SNR$  は SN 比である. 式 (2) に MIMO チャンネル容量の MIMO アンテナ数  $x$  に関する導関数を示す.

$$\frac{dC}{dx} = B \log_2 \frac{1 + \frac{SNR}{x}}{e^{\frac{SNR}{x+SNR}}} \quad (2)$$

式 (2) は  $x \geq 0$  においてつねに 0 以上であることから MIMO チャンネル容量は MIMO アンテナ数に対して単調増加となる (図 1). さらに式 (1) の 2 次導関数は次のようになる.

$$\frac{d^2C}{dx^2} = -\frac{BSNR^2}{x(x+SNR)^2 \log 2} \quad (3)$$

式 (3) は  $x \geq 0$  でつねに 0 以下であるので MIMO チャンネル容量増加はアンテナ数に対して単調減少である (図 2). すなわち, MIMO チャンネル容量はアンテナ数に対して上に凸の単調増加となる. アンテナ数の増加にともないチャンネル容量の増加量が減衰する理由は, 1 アンテナ数に割り当てられる出力が低下するためである. また, 実環境においては, MIMO チャンネルでは, アンテナ数が過度に増加すると, 空間多重化において分割された空間の空間特性の相違が減少し, 容量拡大が鈍化する. 式 (2), (3) および空間分割の特性から過度なアンテナ数を無線システムへ割り当てても大きな容量拡大は期待できない.

#### 3.2 異種無線多重 MIMO チャンネル動的構成方式

3.1 節では MIMO チャンネルの特性により, 単一の MIMO チャンネルでは限界があることを示した. 本提案方式である異種無線多重 MIMO チャンネル動的構成方式では, より容量拡大が見込める無線システムへアンテナを分配・割り当てることにより, 複数の異種無線システムの MIMO 容量総和において拡大を図る. 提案方式は次の 4 つの機能から構成され, その構成図を図 3 に示す.

- 共有アンテナ  
複数の無線システム間で相互に共有利用可能とするアンテナ集合体.
- 多重 MIMO チャンネル  
共有アンテナを割り当てられた無線システム MIMO チャンネルで構成された各無線システム MIMO チャンネルの集合.
- 共有アンテナ分配アルゴリズム  
多重 MIMO チャンネルにおいて各無線 MIMO チャンネル

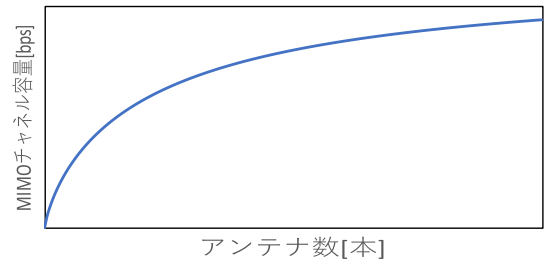


図 1 アンテナ数に対する MIMO チャンネル容量

Fig. 1 MIMO channel capacity according to number of antennas.

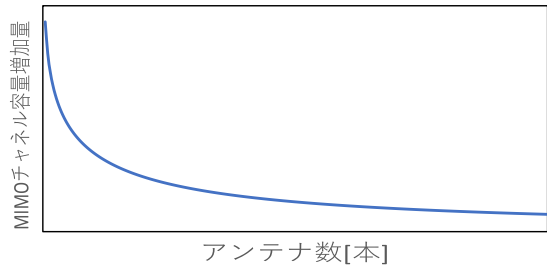


図 2 アンテナ数に対する MIMO チャンネル容量増加量

Fig. 2 Increase in MIMO channel capacity according to number of antennas.

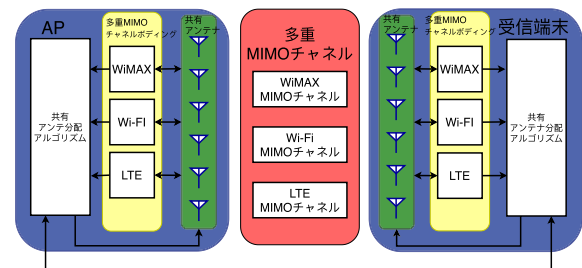


図 3 機能構成図

Fig. 3 Functional configuration.

の総容量を最大化するアンテナ分配数を探索する.

- 仮想単一 MIMO チャンネル構成方式  
複合無線アクセスネットワーク [12] を用いて, 多重の MIMO チャンネルを仮想の単一 MIMO チャンネルに構成・集約する. これにより, アプリケーションのスループット向上を図る.

##### 3.2.1 共有アンテナ分配アルゴリズム

異種無線多重 MIMO チャンネルでは, 異種無線システム間において, アンテナ数に対して相対的に容量拡大が見込める無線システムへ共有アンテナを分配し, 複数の無線システムの MIMO チャンネルの総容量において拡大を図る.

図 4 に共有アンテナ分配に基づく無線システム A および B の MIMO チャンネル容量, 多重 MIMO チャンネル容量を示す.  $x$  軸は無線システム A への共有アンテナ割り当て数,  $y$  軸は MIMO チャンネルの容量を示す. 共有アンテナ数は  $N$  本と一定として, 右に行くほど無線システム A に割り当てるアンテナ数が増え, 逆に無線システム B に割り

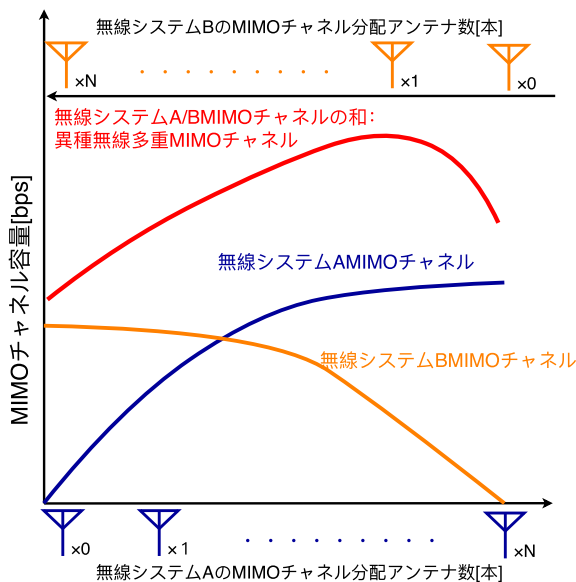


図 4 無線システム A/B の MIMO チャンネル容量および異種無線多重 MIMO チャンネル容量の共有アンテナ分配数に対する依存性

Fig. 4 Dependence of MIMO channel capacity and multiplex MIMO channel capacity in A and B wireless system on antennas distribution.

当てるアンテナ数が減少する。したがって、無線システム A の MIMO チャンネル容量は  $x$  軸に対して上に凸で単調増加し、一方、無線システム B は上に凸で単調減少する。異種無線多重 MIMO チャンネル容量はこれら個々の無線システムの MIMO チャンネル容量の和であり、この容量は共有アンテナ分配数に対して上に凸となる。すなわち、MIMO のチャンネル容量和を最大化する供給アンテナの分配数が存在する。

最適な共有アンテナ分配数の探索に最急降下法 [13] を適用する。共有アンテナ分配においてチャンネル容量が上昇する方向を選択して最適解を探索する。共有アンテナ分配  $t$  回目の無線システム A の共有アンテナ分配数を  $A(t)$ 、共有アンテナ分配  $t$  回目における無線システム A, B の MIMO チャンネル総容量を  $C(t)$  とする。式 (4) に動的な共有アンテナ分配のアンテナ更新則を示す。

$$A(t+1) = \begin{cases} A(t) + 1 & (C(t) \geq C(t-1)) \\ A(t) - 1 & (C(t) < C(t-1)) \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) を繰り返すことで容量を最大化する最適な共有アンテナ分配数を探索する。図 4 のように、上に凸関数になると考えられるので、局所解に囚われることはない。

式 (4) に基づくアンテナ分配の手順を図 5 を用いて具体的な共有アンテナ分配の動作を説明する。ここで示す図 5 の共有アンテナ数は 4 本とする。

**Step0.** 初期の共有アンテナ分配を設定（無線システム A1 本、無線システム B3 本）。

**Step1.** 共有アンテナ分配を任意に 1 アンテナ移動する（図 5 グラフ (a) の左端の緑矢印：無線システム B か

ら無線システム A へ）。

**Step2-1.** MIMO チャンネル容量和が増加する場合は、同アンテナ移動方向を MIMO チャンネル容量和増加方向として設定する（図 5 グラフ (a) ではアンテナ移動方向を右向きにする）。

**Step2-2.** MIMO チャンネル容量和が減少する場合は、逆方向アンテナ移動を MIMO チャンネル容量和増加方向として設定する（図 5 グラフ (b) ではアンテナ移動方向を右向きにする）。

**Step3.** MIMO チャンネル容量が減少するまで設定した方向へ 1 アンテナずつアンテナ移動を繰り返す（図 5 グラフ (a) の左から 2 番目、3 番目の緑矢印：無線システム B から無線システム A へ）。

**Step4.** アンテナ移動により MIMO チャンネル容量が減少した場合は Step2-2 へ戻る。

以上の手順で動的にチャンネル容量が最大になる場合の共有アンテナ分配数を探索する。

しかし、上記手順においては Step2-2 から Step4 の手順が、MIMO チャンネル容量和を最大化する最適アンテナ分配数（以降、最適アンテナ分配）の近傍で繰り返すことになり、最適アンテナ分配を維持できない。したがって、最適アンテナ分配を維持するとともに、最適アンテナ分配の探索時間を短縮するため、共有アンテナ分配周期インターバルを動的に変更する。

共有アンテナ分配周期インターバルが短い場合と長い場合では以下のことが考えられる。

- インターバルが短い場合

利点：短期間で最適な共有アンテナ分配数に到達する。

問題点：分配周期インターバルを短くすると、スループットの計測期間が短くなり、スループットの瞬時変動に過度に反応して、分配が振動する。

- インターバルが長い場合

利点：スループットの計測時間が長くなり、大域的なスループット値が得られ、安定した共有アンテナ分配がされる。

問題点：スループットの変動に鈍感になり、共有アンテナ分配の処理に遅延が生じる。

以上の利点、問題点より、共有アンテナ分配の処理を、最適アンテナ分配探索フェーズ（以降、分配探索フェーズ）と最適アンテナ分配維持フェーズ（以降、分配維持フェーズ）に分ける。分配探索フェーズとは、MIMO チャンネル容量を最大化する最適アンテナ分配を探索するまでの期間とし、探索を短期間で行うため、共有アンテナ分配周期インターバルに短周期インターバル（S-Interval）を用いる。分配維持フェーズとは、分配探索フェーズにより探索された最適アンテナ分配を維持する期間とし、安定したスループット値を取得するため、共有アンテナ分配周期インターバルに長周期インターバル（L-Interval）を用いる。



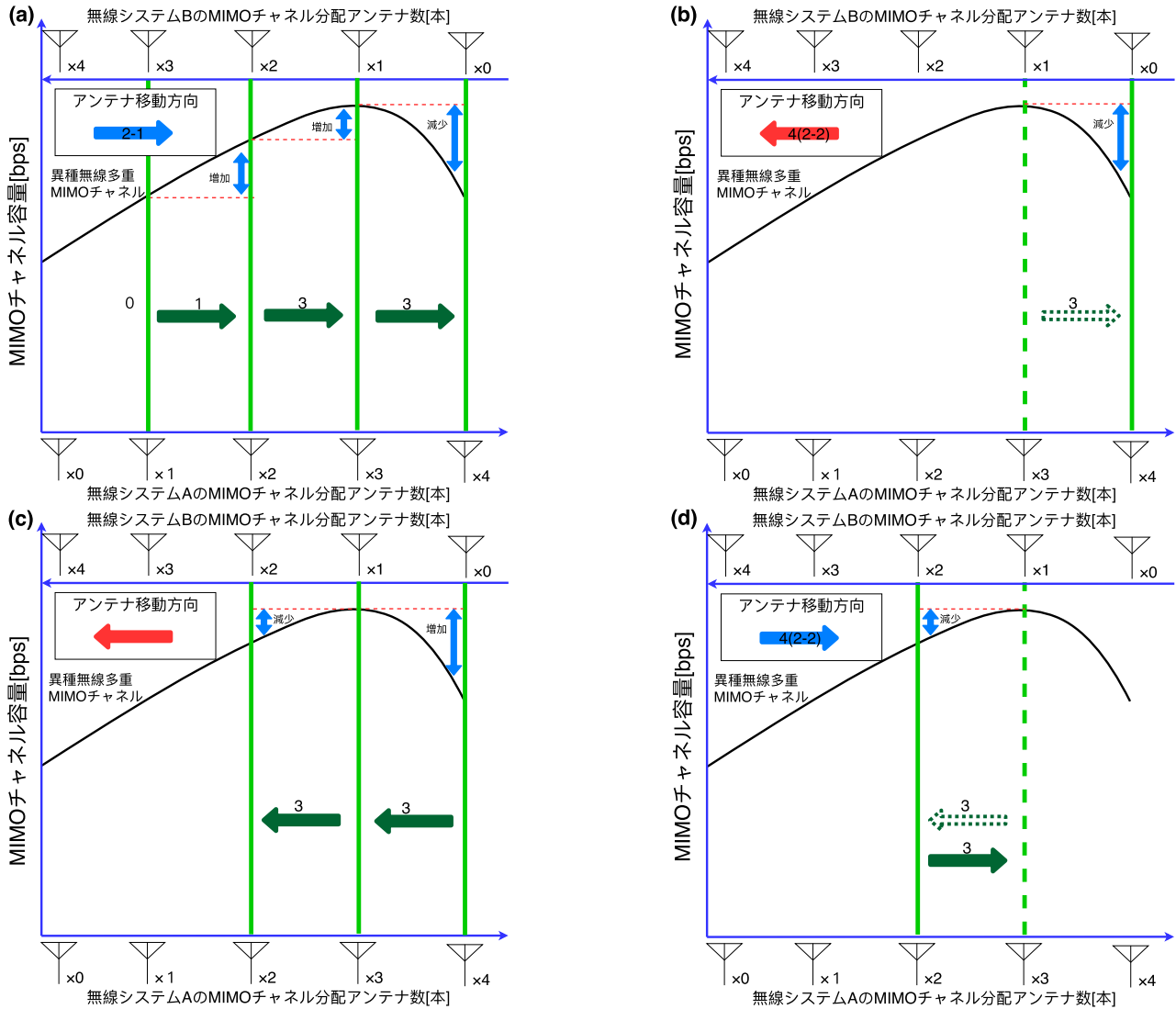


図 5 動的な共有アンテナ分配機能  
Fig. 5 Dynamic distribution for shared antennas.

共有アンテナ分配の処理手順について説明する．初期では分配探索フェーズとして，共有アンテナ分配周期インターバルを S-Interval に設定し，共有アンテナ分配周期切替条件に式 (5) を用いる． $C(t) \geq C(t-1)$  の場合は，分配探索フェーズを継続し，Step3 を実施する． $C(t) < C(t-1)$  の場合は，図 5 の Step4 から Step2-2 に戻り，最適アンテナ分配数を発見したと想定して，分配維持フェーズへ移行し，S-Interval を L-Interval へと切り替えて，その切替条件を式 (5) から式 (6) に変更する．分配維持フェーズにおける式 (6) は，最適アンテナ分配で発生する微小変動を無視し，無用なアンテナ分配を抑制するため，感度レート  $Q$  ( $0 < Q < 1$ ) を導入する．分配維持フェーズにおいて，共有アンテナ分配周期切替条件の式 (6) で  $C(t) \geq C(t-1) * Q$  の場合は，分配維持フェーズを継続し現行の共有アンテナ分配数を維持する． $C(t) < C(t-1) * Q$  の場合は，MIMO チャンネル状況が変動したと想定して，分配探索フェーズへ移行し，L-Interval を S-Interval へ切り替えて Step2-2 へ

戻る．また，共有アンテナ分配周期切替条件を式 (6) から式 (5) にする．

$$\begin{aligned} & \text{Interval [sec]} \\ & = \begin{cases} S - \text{Interval [sec]} & (C(t) \geq C(t-1)) \\ L - \text{Interval [sec]} & (C(t) < C(t-1)) \end{cases} \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Interval [sec]} \\ & = \begin{cases} L - \text{Interval [sec]} & (C(t) \geq C(t-1) * Q) \\ S - \text{Interval [sec]} & (C(t) < C(t-1) * Q) \end{cases} \quad (6) \end{aligned}$$

共有アンテナ分配アルゴリズムは，図 6 に示すように，各無線システムで計測された MIMO チャンネルスループットを入力とし，出力として共有アンテナ機能へ分配数を指示する．共有アンテナ分配機能では各無線システムへ共有アンテナを分配し，各無線システムが分配された共有アンテナを用いて MIMO チャンネルを構成し通信を実施し，計測されたスループットを共有アンテナ分配アルゴリズムに

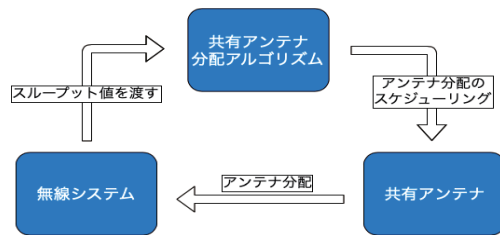


図 6 共有アンテナ分配モジュール

Fig. 6 Modules in shared antennas distribution.

フィードバックする。以上の制御フィードバックループを繰り返し、MIMO チャンネル容量和を最大化するアンテナ分配数を共有アンテナ分配アルゴリズムで探索する。

### 3.3 仮想単一 MIMO チャンネル構成方式

仮想単一 MIMO チャンネルはアプリケーションのスループットを拡大するために、共有アンテナ分配により最適に構成された複数の MIMO チャンネルを IP レイヤと MAC レイヤ間で集約して、IP レイヤ以上において仮想的な単一 MIMO チャンネルとして構成する。複数の無線システムの MIMO チャンネルを集約する仮想チャンネルボンディング (Virtual Channel Bonding) レイヤを IP レイヤと Mac レイヤ (I/F) の間のサブレイヤとして構成する (図 7)。

仮想チャンネルボンディングレイヤによる実装構造とパケットの流れを図 8、図 9 を用いて説明する。

図 8 において、

- 送信側アプリケーション、受信側アプリケーションの IP アドレスはそれぞれ 192.168.10.1, 192.168.10.2 とし、仮想チャンネルボンディング I/F に対応する。
- 送信側に装備されている 4 つの実無線 I/F の IP アドレスは、それぞれ 10.0.1.1, 10.0.2.1, 10.0.3.1, 10.0.4.1 とする。
- 受信側に装備されている 4 つの実無線 I/F の IP アドレスは、それぞれ 10.0.1.2, 10.0.2.2, 10.0.3.2, 10.0.4.2 とする。

ここで、送信側においてアプリケーションが送信元 192.168.10.1 として送信先 192.168.10.2 ヘッダを送信する場合について仮想チャンネルボンディングを説明する。

- (1) 当該データは IP レイヤにおいて送信元 192.168.10.1, 送信先 192.168.10.2 とする IP ヘッダが付与されて、IP パケットとして仮想チャンネルボンディングレイヤにパケットへ引き渡される。
- (2) 仮想チャンネルボンディングレイヤでは集約している実無線 I/F のいずれかに IP パケットを転送するため、転送先として選択した実無線 I/F の IP アドレスに基づいて送信元 10.0.x.1, 送信先 10.0.x.2, ルーティングプロトコルを仮想チャンネルボンディングとする IP ヘッダ (図 9) を付与して、選択無線 I/F へ引き渡す。
- (3), (4) 送信側の無線 MAC レイヤから受信側の MAC

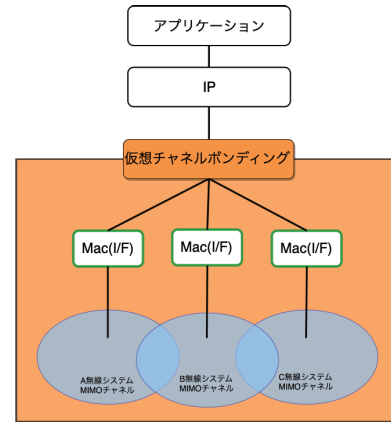


図 7 仮想チャンネルボンディングによる複合無線システムの隠蔽

Fig. 7 Transparency of heterogeneous wireless system with virtual channel bonding.

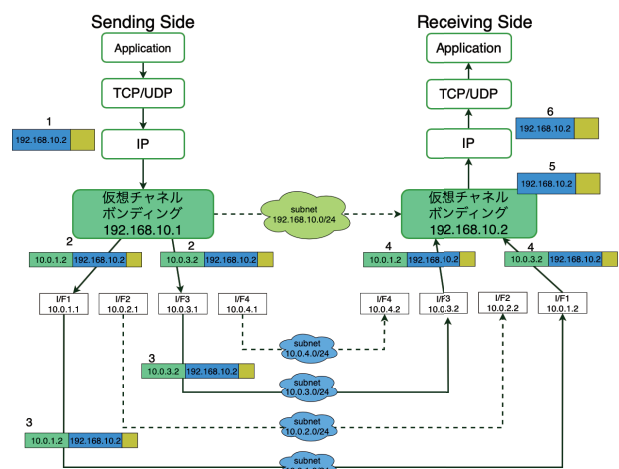


図 8 仮想チャンネルボンディングのプロトコルスタック構造

Fig. 8 Protocol stack in virtual channel bonding.



図 9 パケット構成

Fig. 9 Packet format structure.

レイヤヘッダが到着し、受信側 MAC からルーティングプロトコルとして仮想チャンネルボンディングレイヤへ IP パケットが引き渡される。

- (5) 受信側の仮想チャンネルボンディングレイヤでは、IP ヘッダの送信先 IP アドレス 10.0.x.2 を確認し、当該 IP ヘッダを取り外し、送信元 192.168.10.1, 送信先 192.168.10.2 とする IP パケットを IP レイヤへ引き渡す。
- (6) IP レイヤは IP ヘッダの送信先 IP アドレスを確認して上位レイヤにパケットを渡す。最終的に受信側のアプリケーションにパケットが到着する。

以上より、アプリケーションレイヤからは複数の無線システムを隠蔽し、パケットの送受信を可能とする。

4. 性能評価

提案方式を QualNet ネットワークシミュレータを用いて評価する．評価は受信側を固定した場合（シナリオ 1）と移動した場合（シナリオ 2）において行う．

4.1 評価条件

図 10 のようにネットワークが構成される．以下にシミュレーション条件を示す．

シナリオ 1 では表 1 の条件で基地局と受信端末を距離 5m に固定した場合で，提案方式が有効であるかを検証する．シナリオ 2 は表 1, 表 2 の条件で端末を移動させた場合で最適な共有アンテナ分配が継続的に実施できているかを確認する．共有アンテナ分配機能に入力するスループット値は，共有アンテナ分配時間周期のインターバルで受信したデータ量の平均スループットを式 (7) で算出する．

期間スループット [bps] = (受信データ量 [bit] / Interval [sec]) (7)

4.2 共有アンテナ分配周期インターバルの評価（シナリオ 1）

IEEE802.11n (11n) と IEEE.802.11ac (11ac) において 4 本の共有アンテナを用いる場合，事前計測により 11n に 3 アンテナ，11ac に 1 アンテナを分配したケースで最大容量 75 Mbps となる．この最適アンテナ分配を指標として，提案方式の共有アンテナ分配アルゴリズム，S-interval, L-interval, 感度レートの有用性を検証する．送信側と受信側との距離を 5m に固定し，100 Mbp までのトラフィックにおいて，次の 4 ケースをスループットを比較する．

- 提案方式  
提案手法では，S-Interval を 0.5 sec, L-Interval を 3.0 sec に設定する．感度レート Q を 0.98 に設定する．
- 最適アンテナ分配  
前述の最大容量となる 11n へ 3 アンテナ，11ac に 1 アンテナを固定分配する．
- 短周期分配  
一様に短周期で提案方式に基づいてアンテナ分配を行い，感度レートを無効とする．すなわち，提案方式において，S-Interval, L-Interval とともに 0.5 sec, 感度レートを 1.0 とする．
- 長周期分配  
一様に長周期で提案方式に基づいてアンテナ分配を行い，感度レートを無効とする．すなわち，提案方式において，S-Interval, L-Interval とともに 3.0 sec, 感度レートを 1.0 とする．

図 11 より，トラフィック量 40 Mbps 以下では，提案方式，短周期分配，長周期分配のどのケースでもすべてのトラフィックの転送が可能であることが分かる．すなわち，

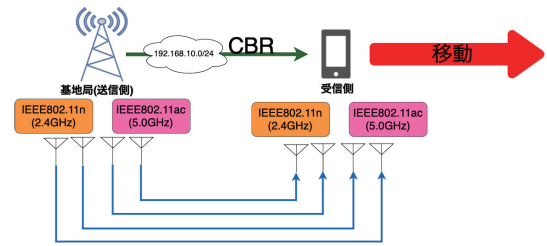


図 10 シナリオ構成  
Fig. 10 Evaluation scenarios.

表 1 シミュレーション諸元  
Table 1 Simulation parameters.

| 設定項目             | シナリオ 1                  | シナリオ 2 |
|------------------|-------------------------|--------|
| 共有アンテナ数 [本]      | 4                       |        |
| 無線システム           | IEEE802.11n, 11ac (表 2) |        |
| 送信電力 [dbm]       | 50                      |        |
| シミュレーション時間 [sec] | 300                     | 150    |
| パケット送信開始時間 [sec] | 0                       |        |
| パケット送信終了時間       | シミュレーション終了まで            |        |
| アプリケーション         | CBR (固定ビットレート)          |        |
| トラフィック [Mbps]    | 5, 10, ..., 100         | 10     |
| 感度レート Q          | 0.98                    |        |
| S-Interval [sec] | 0.5                     |        |
| L-Interval [sec] | 3.0                     |        |
| 移動距離 [m]         | -                       | 0~150  |

表 2 無線システムの利用周波数  
Table 2 Frequency in each wireless system.

| 通信システム       | 使用周波数   | 最大通信範囲   |
|--------------|---------|----------|
| IEEE802.11n  | 2.4 GHz | 150 m 以上 |
| IEEE802.11ac | 5.0 GHz | 約 50 m   |

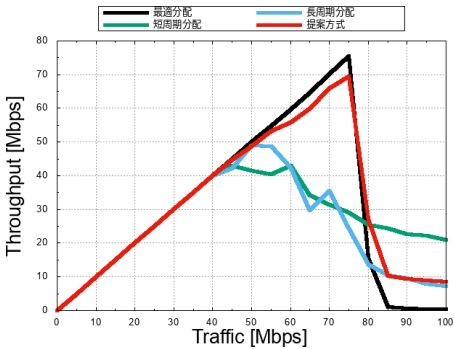


図 11 各ケースのスループット推移  
Fig. 11 Throughput transition of each methods according to traffic.

どのようなアンテナ分配においても MIMO チャネル容量がトラフィック量を上回っていると考えられる．

トラフィック量 45 Mbps 以上では，短周期分配，長周期分配のケースにおいて，スループットが大幅に低下するが，提案方式ではスループットを大きく低下する場合はなく，最適アンテナ分配に近いスループットとなる．提案方式，

短周期分配, 長周期分配のいずれも共有アンテナ分配アルゴリズムにより最適な分配を発見しているが, 提案方式は最適分配を維持でき, 一方, 短周期分配と長周期分配を維持できない. これを示すため, 次に, 各ケースの詳細な共有アンテナ分配, スループットの変動を示す.

図 12 はトラフィック 75 Mbps において, 提案方式, 短周期分配, 長周期分配の各ケースでの, 共有アンテナの無線システム 11n への分配数の変動を示す. 図 12 より, 短周期分配と長周期分配のケースを比較した場合, 短周期分配では 10 sec に探索を完了し, 長周期分配では 47 sec に探索を完了している. インターバルが短い短周期分配の方が早く探索を完了している. これは, 切り替えタイミングが早い場合, 最適な共有アンテナ分配数 (11n に 3 本, 11ac に 1 本) を短時間で探索できる. しかし, スループットの瞬時変動に過度に反応して, 共有アンテナ分配が頻繁に行われるため, 最適なアンテナ分配を維持できず, スループットが低下している. 長周期分配は 47 sec で最大化アンテナ分配に至るが, 感度レートが 1 で高いため, スループットの微小変動により無用なアンテナ分配が発生し, 短周期分配と同様に 75 Mbps のスループットを得られない. 一方, 提案方式では 24 sec で探索を完了し, その後, 最適なアンテナ分配を維持することで, 高いスループットになる.

図 13 はトラフィック 75 Mbps において, 提案方式, 短周期分配, 長周期分配の各ケースでの, スループット変動を示す. 前述のように, 図 12 において短周期分配は 10 sec で最適アンテナ分配に至るが, 短時間におけるスループットの瞬時変動に過剰に反応して, 最適アンテナ分配を維持できない. そのため, 75 Mbps のスループットを得られない. 同様に, 長周期分配においても前述のように分配維持フェーズにおけるスループットの微小変動により無用なアンテナ分配が行われ, 最適アンテナ分配の近傍で振動して, 75 Mbps のスループットを維持できない. 提案方式では, 24 sec で探索を完了し, 探索を完了後, 安定して最適アンテナ分配を維持して (図 12 の 25 sec 以降), 75 Mbps のスループットとなる.

提案方式, 短周期分配, 長周期分配のいずれも最適アンテナ分配は発見できている点において, 分配アルゴリズムは機能している. 最適アンテナ分配探索時間は, 提案方式は 24 sec であり, 短周期分配の 10 sec に及ばないが長周期分配の 47 sec より 23 sec 早い. このことから, S-Interval の有用性が認められる. 最適アンテナ分配発見後において, 短周期分配や長周期分配ではこれを維持できない. 短周期分配は分配周期が短いことが原因であるが, 長周期分配は周期が長い振動が発生する. 一方, 提案方式は最適アンテナ分配発見後, これを維持して高いスループットとなることから, L-interval と感度レートの組み合わせが有効に機能していると考えられる.

提案方式が短周期分配と同様の最適アンテナ分配探索時

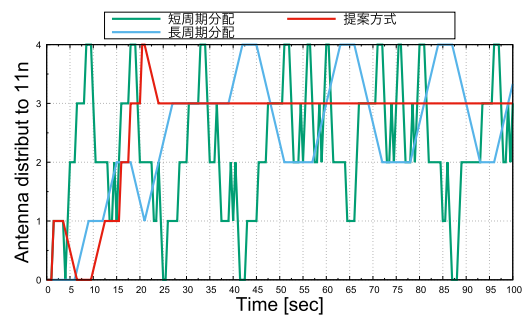


図 12 75 Mbps における各ケースの共有アンテナ分配推移  
Fig. 12 Transition of shared antenna distribution in each methods on 75 Mbps traffic.

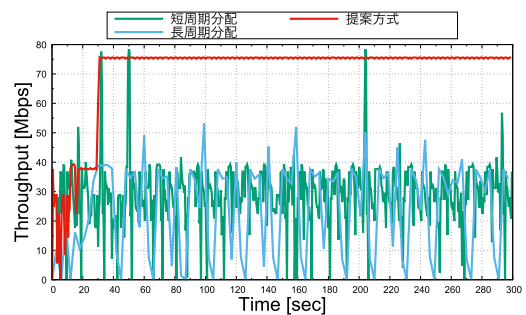


図 13 75 Mbps における各ケースのスループット推移  
Fig. 13 Transition of throughput in each methods on 75 Mbps traffic.

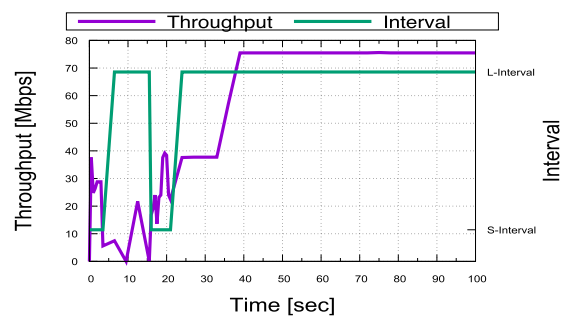


図 14 75 Mbps における分配周期とスループットの推移  
Fig. 14 Switch over S-interval/L-interval and throughput transition on 75 Mbps traffic.

間とならないことを考察する. 図 14 は, トラフィックが 75 Mbps の場合での提案方式のスループットと共有アンテナ分配周期インターバルの推移を示す. 2~15 sec の期間は, その期間直前の S-Interval による一時的スループットの減少から L-Interval へと切り替わり分配維持フェーズとなっている. しかし, 15 sec から S-Interval へ切り替わり分配探索フェーズへ移行し, 24 sec で最適アンテナ分配を発見し L-Interval へ切り替わり分配維持フェーズへ移行し, これを維持する. この探索時間は 9 sec であり, 短周期分配とほぼ同等である. すなわち, 2~15 sec の一時的に分配維持フェーズへ移行することを回避すれば, 短周期分配と同様に短時間で最適アンテナ分配を発見できると考える. また, 図 11 における提案方式と最適アンテナ分配との 45 Mbps



以上でのスループットの差は、提案方式が上記のような最適アンテナ分配を探索し発見するまでのスループットによる差であり、探索時間が短縮できれば、最適アンテナ分配と同等の平均スループットになる。

#### 4.3 移動時のスループット評価

受信側を移動し各無線システムの容量が変動した場合においても継続的に共有アンテナ分配を実施してスループットの最大化を維持できるかを検証する。トラフィック量は送信側と受信側との最大距離 150 m において通信可能とするトラフィック量 10 Mbps として設定する。図 15 は、提案方式と 4 本の共有アンテナを 11n と 11ac に固定分配した 5 つのケースの移動距離に対してスループットの推移を示す。また、無線システムへの電力分配は表 3 のように、電力を使用無線システム数で平等に分割している。図 15 から、各固定アンテナ分配ケースにおいて 10 Mbps トラフィックに対して次の地点で容量超過が発生する。

- 11n × 1 本, 11ac × 3 本 (図 15 の水色線) において、約 11 m 地点以降ではアンテナ 1 本に対して 8.3 dbm 割り振られている 11ac × 3 本がその出力から通信不可になり容量超過が発生する。
- 11n × 2 本, 11ac × 2 本 (図 15 の橙色線) において、約 39 m 地点以降ではアンテナ 1 本に対して 12.5 dbm 割り振られている 11ac × 2 本がその出力から通信不可になり容量超過が発生する。
- 11n × 3 本, 11ac × 1 本 (図 15 の黄色線) において、約 44 m 地点以降ではアンテナ 1 本に対して 25 dbm 割り振られている 11ac × 1 本がその出力から通信不可になり容量超過が発生する。
- 11ac × 4 本 (図 15 の緑線) において、55 m 地点以降では通信不可になる。

55 m 地点以降でトラフィック 10 Mbps を十分に送信できる共有アンテナ分配数は「11n × 4 本」唯一になる。

図 15 の提案手法では、11 m 地点で共有アンテナ分配数「11n × 1 本, 11ac × 3 本」が容量超過することにより、一時的にスループットが低下するが、ただちに 10 Mbps に復帰している。図 16 は提案手法でのインターバル切替と共有アンテナ分配数の推移を示す。図 16 より、11 m 地点通過後の共有アンテナ分配は、「11n × 2 本, 11ac × 2 本」に分配されている。共有アンテナ分配周期インターバルは S-Interval から L-Interval に切り替わり、分配維持フェーズになっていることが分かる。次に、39 m 地点で共有アンテナ分配数「11n × 2 本, 11ac × 2 本」が容量超過することにより、スループットが低下する。図 16 より、39 m 地点通過後は、共有アンテナ分配数「11n × 2 本, 11ac × 2 本」が容量超過になることに反応して、また、共有アンテナ分配インターバルが S-Interval へ切り替わって分配探索フェーズになっており、スループットの変動とともに「11n × 3 本,

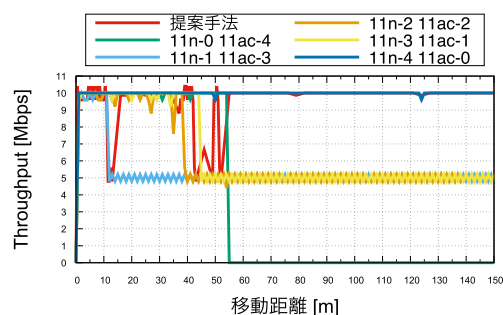


図 15 提案方式と各アンテナ分配のスループット推移

Fig. 15 Throughput transition and antennas distribution in proposed method and 5 fixed distribution cases.

表 3 無線システムへの電力分配

Table 3 Power distribution to wireless systems.

| 共有アンテナ分配組合せ           | 11n への電力 | 11ac への電力 |
|-----------------------|----------|-----------|
| 11n × 0 本, 11ac × 4 本 | 0 dbm    | 50 dbm    |
| 11n × 1 本, 11ac × 3 本 | 25 dbm   | 25 dbm    |
| 11n × 2 本, 11ac × 2 本 | 25 dbm   | 25 dbm    |
| 11n × 3 本, 11ac × 1 本 | 25 dbm   | 25 dbm    |
| 11n × 4 本, 11ac × 0 本 | 0 dbm    | 50 dbm    |

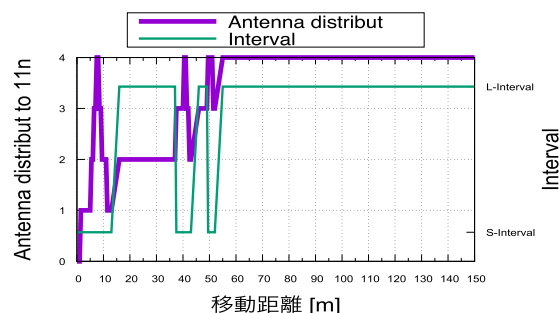


図 16 提案方式での分配周期と共有アンテナ分配数の推移

Fig. 16 Switch over S-interval/L-interval and shared antennas distribution in proposed method.

11ac × 1 本」または「11n × 4 本」を遷移し、容量超過を回避し、いったん、「11n × 3 本, 11ac × 1 本」で最適分配を発見し、L-interval へ切り替わり分配維持フェーズへ移行する。続けて、44 m 地点で共有アンテナ分配数「11n × 3 本, 11ac × 1 本」が容量超過後、スループットが低下し、約 50 m 地点で 10 Mbps に復帰している。図 16 より、44 m の直前で最適分配「11n × 3 本, 11ac × 1 本」を発見し分配維持フェーズに移行したことから、L-interval 経過後に 11ac の不通から容量超過を検知して、分配探索フェーズへ移行するため、この間である 44~50 m においてスループットが低下する。しかし、その後、探索を継続し、55 m の手前で最適分配「11n × 4 本」を発見して、分配維持フェーズに移行する。以降、10 Mbps のスループットを維持する。

以上より、提案方式は、受信側を移動させた場合における MIMO チャネルの容量変動に対して継続的に最適に共有アンテナを分配することができると考えられる。

## 5. まとめ

本論文では、異種無線システム間でアンテナを共有して構成される多重 MIMO チャネル総容量は各無線システムへの共有アンテナ分配数に対して上に凸であることを示した。また、多重 MIMO チャネル総容量を拡大するため、示した多重 MIMO チャネル特性に基づいて、最適に共有アンテナを異種無線システム間で分配する異種無線多重 MIMO チャネル動的構成方式を提案した。

提案方式の基本性能評価として、位置固定時のスループット、移動時のスループットの評価から、提案方式は、多重 MIMO チャネルの総容量拡大により、アプリケーションスループット拡大を可能とすることを示した。

今後は、S-Interval, L-Interval, 感度レートの動的な設定方式と複数の移動ノードとの通信における有用性を検証する予定である。

## 参考文献

- [1] 総務省：平成 29 年版情報通信白書データ流通量の爆発的拡大 (2017), 入手先 (<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/html/nc121210.html/>).
- [2] 総務省：平成 30 年版情報通信白書 5G の特徴 (2018), 入手先 (<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/html/nd133420.html>).
- [3] 今川隆司, 池下貴大, 筒井 弘, 宮永善一: MIMO-OFDM 無線通信における信号分離のためのパイプライン型逆行行列演算回路のアーキテクチャ検討, 信学技報, Vol.117, No.273, pp.105–108 (2017).
- [4] 不破 力, 岡田 啓, 小林健太郎, 片山正昭: MU-MIMO を用いた無線メッシュネットワークにおける面的伝送効率を考慮した MAC プロトコルの検討, 研究報告モバイルコンピューティングとパーベシブシステム (MBL), Vol.2017-MBL-82, No.53, pp.1–6 (2017).
- [5] Zhou, A., Wei, T., Zhang, X. and Ma, H.: Guidepost: Scalable MU-MIMO User Selection via Indirect Channel Orthogonality Evaluation, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.18, No.7, pp.1556–1570 (2019).
- [6] Hao, W. and Muta, O.: Performance Evaluation of Centralized Massive MIMO Heterogeneous Network Using Dynamic Small-cell Base Station Clustering, 研究報告オーディオビジュアル複合情報処理 (AVM), Vol.2017-AVM-99, No.17, pp.1–5 (2017).
- [7] Yamaguchi, S., Watanabe, H., Yoshioka, H., Morimoto, Y., Nakamizo, H., Tsutsumi, K., Shinjo, S., Uchida, S., Okazaki, A., Fukasawa, T. and Yoneda, N.: Development of 28GHz band Massive MIMO Antenna RF Frontend Module for 5G, *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, pp.629–630 (2018).
- [8] Sezgin, I.C., Eriksson, T., Gustavsson, J. and Fager, C.: Evaluation of Distributed MIMO Communication Using a Low-Complexity Sigma-Delta-over-Fiber Testbed, *IMS*, pp.754–757 (2019).
- [9] Valenzuela-Valdes, J.F., Guerrero, A.L., Heredia, J.D.S., Gonzalez, A.M. and Hallbjorner, P.: Measuring Distributed MIMO System in Reverberation Chamber, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*,

Vol.12, pp.1586–1589 (2013).

- [10] Faisal, K.N., Sarkar, Z.L., Sultana, R. and Mukhtadir, S.: Security analysis of co-located and distributed MIMO interference networks with linear receivers, *2016 2nd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering* (2016).
- [11] Shannon, C.E.: A mathematical theory of communication, *Bell Syst. Tech. J.*, Vol.27, pp.379–423, 623–656 (1948).
- [12] 野田健太郎, 安達直世, 滝沢泰久: 移動通信環境における複合無線アクセスネットワーク制御方式, 情報処理学会論文誌, Vol.56, No.2, pp.448–459 (2015).
- [13] 尾関孝史: 非線形関数における最急降下法の振る舞い, 福山大学工学部紀要, Vol.26, pp.113–123 (2002).

## 推薦文

本稿では、異種無線多重 MIMO チャネル動的構成方式において、動的にインターバルを調整することで、チャネル探索時間の削減及びアンテナ振動の抑制を実現する方式を提案しています。先行研究と提案手法との差分が明らかに示されており、新規性が高く、また、今後の 5G 普及にともなうアンテナ数増加を対象とした改善である点から、完成度が高い論文であり、今後複数ノードとの通信における有用性の評価、実世界での評価など、今後の実践的な取組が期待されます。以上の理由により、本論文を推薦いたします。

(マルチメディア通信と分散処理研究会主査 田上 敦士)



奥本 裕介 (学生会員)

2019 年関西大学環境都市工学部都市システム工学科卒業。現在、関西大学大学院博士課程前期課程において無線ネットワーク等の研究に従事。



滝沢 泰久 (正会員)

1983 年京都工芸繊維大学工芸学部機械工学科卒業。同年日本ユニシス (株) 入社。1990 年住友金属工業 (株) 入社。1998 年 ATR 環境適応研究所出向。2002 年 ATR 適応コミュニケーション研究所主任研究員。2008 年同

研究所上級主任研究員。2009 年関西大学環境都市工学部准教授, ATR 適応コミュニケーション研究所客員研究員。2014 年関西大学環境都市工学部教授。現在、無線ネットワークにおける自己組織化等の研究に従事。博士 (工学)。電子情報通信学会, IEEE, IEEE-CS 各会員。